

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление, специальность: *Материаловедение и технологии материалов*

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Оптимизация параметров процесса послойного спекания металлических порошков селективным лазерным излучением

УДК 621.762.5-024.28:621.373.826

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б51	Юань Сюдун		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Зенин Б. С.	к.ф.-м.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И. В.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л. А.	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Б. Б.	к.т.н., доцент		

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов (бакалавриат)*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление, специальность: *Материаловедение и технологии материалов*

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
Овечкин Б. Б.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4Б51	Юань Сюдун

Тема работы:

Оптимизация параметров процесса послойного спекания металлических порошков селективным лазерным излучением	
Утверждена приказом директора	Приказ № 1542/с от 27.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><i>В работе был исследован процесс формирования отдельного слоя материала методом лазерного аддитивного плавления. Рассмотрены особенности формирования отдельного слоя и выполнено физическое и математическое моделирование процесса.</i></p> <p><i>Из-за сложности экспериментального исследования условий формирования отдельного слоя при аддитивном производстве, при анализе использовалось численное моделирование процесса, в связи с чем негативное воздействие на окружающую среду отсутствует.</i></p> <p><i>При реализации численного моделирования процесса аддитивного лазерного плавления в качестве модельных материалов использовались Ti, Al, Ni.</i></p> <p><i>Численное моделирование проводилось при помощи компьютерной программы, написанной на основании разработанных моделей.</i></p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор, включающий характеристику особенностей условий формирования отдельного слоя материала в процессе лазерного аддитивного производства.</li> <li>2. Разработать физическую и математическую модели процессов, протекающих при обработке металлического порошка лазерным лучом. Оценить тепловое вложение лазерного луча, необходимое для оплавления металлического порошка.</li> <li>3. Провести анализ результатов численного моделирования, выявить зависимости теплового вложения лазерного луча от технологических параметров процесса и физических характеристик модельных материалов.</li> <li>4. Обсуждение результатов работы.</li> <li>5. 5. Дополнительные разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность».</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Презентация ВКР в Power Point</p>

### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	И.В. Подопригора, доцент, ТПУ
Социальная ответственность	Л.А. Скачкова, старший преподаватель, ТПУ

### Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:


Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Зенин Б. С.	к.ф.-м.н.,		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б51	Юань Сюдун		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 88 с., 17 рис., 28 табл., 32 источников.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, моделирование, металлический порошок, технологические параметры, микроструктуры, полиметаллические материалы.

Объектом исследования является процесс формирования отдельного слоя материала в процессе лазерного аддитивного плавления.

Цель работы – определить оптимальный режим изготовления металлического изделия с помощью селективного лазерного спекания.

В процессе исследования проведены численные расчеты термических условий формирования отдельного слоя материала при лазерном плавлении и экспериментально исследованы особенности строения оплавленного слоя, полученного с помощью селективного лазерного спекания на машине «ЛУЧ».

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: в рамках разработанного подхода можно определять оптимальные технологические характеристики процесса лазерной обработки материала.

Степень внедрения: проведено исследование.

Область применения: проведение сравнительного анализа необходимого теплового вложения лазерного луча для оплавления металлического порошка из различных материалов в процессе аддитивного производства.

Экономическая эффективность/значимость работы полученные результаты будут использованы для проведения расчетов оптимальных технологических параметров лазерного аддитивного производства.

В будущем планируется дальнейшее исследование процесса лазерной обработки материала и дальнейшее совершенствование математической модели, позволяющей проводить расчеты оптимальных технологических

параметров сложных технологических процессов аддитивного производства.

## **ABSTRACT**

Graduation paper 91 p., 18 pic., 23 tablets, 28 sources, 2 app.

Key words: additive technologies, selective laser melting, modeling, metal powder, process parameters.

The object of the study is fabrication of single layer of material in the process of laser additive melting.

The aim of the work is to develop a computer model of the fabrication of single material layer by laser beam in the process of additive manufacturing.

During the research numerical experiments on laser additive melting of model materials were carried out.

As a result of the research the physical and mathematical models of the laser additive melting process were developed; according to the developed models, computer program «Freyja» was written; process parameters of laser melting and physical characteristics of model materials influence on thermal attachment of the laser beam was estimated.

The main design, technological and technical and operational characteristics: it is possible to define the technological characteristics of the laser processing of the material within the frameworks of the developed model.

Degree of implementation: the study was conducted.

Scope: conducting a comparative analysis of the required thermal investment of the laser beam to melt metal powder from various materials in the additive manufacturing process.

Economic efficiency / significance of the work: the obtained results will be used to calculate the optimal process parameters of laser additive manufacturing.

In the future, it is planned further research of the laser processing of material and further improvement of the mathematical model, allowing make calculations of the optimal process parameters of complex additive manufacturing processes.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В данной работе использованы следующие термины с соответствующими определениями:

**Металлический порошок** – это аморфная масса мелких частиц металлов или их сплавов. Порошки используют для изготовления изделий методом аддитивных технологий и порошковой металлургии.

**Насыпная плотность** – плотность в неуплотненном состоянии. Она учитывает не только объем самих частиц материала, но и пространство между ними.

**Скрытая теплота** — теплота, высвобождаемая или поглощаемая термодинамической системой при изменении своего состояния, но не сопровождаемая изменением температуры.

**Модель** – упрощённое представление действительного объекта и протекающих в нём процессов.

**Спекание** – процесс получения твёрдых и пористых изделий и материалов из мелких порошкообразных или пылевидных материалов при повышенных температурах.

**Адгезия** – возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведённых в соприкосновение.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.005 – 88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
3. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1).
4. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

5. ГОСТ 1639-2009. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия
6. ГОСТ 2787-75. Металлы черные вторичные. Общие технические условия.
7. ГОСТ 17.2.3.02-78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями.
8. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
9. СН-245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.
10. СН-181-70. Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий.
11. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
12. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
13. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.



## Содержание

Введение.....	11
1 Обзор литературы .....	14
1.1 Технологии аддитивного производства .....	14
1.2 Материалы, применяемы в аддитивных технологиях .....	20
1.3 Особенности формирования соединения на границе раздела слоев. ....	24
1.4 Достоинства и недостатки технологий аддитивного производства..	26
2 Объект и методы исследования.....	28
2.1 Моделирование процесса формирования отдельного слоя материала методом лазерной аддитивной технологии .....	28
2.2 Условия получения спеченного слоя .....	29
2.3 Теоретические расчеты и анализы.....	34
2.4 Влияние технологических параметров на скорость движения лазерного луча.....	37
3 Экспериментальное изучение оплавленного слоя.....	40
3.1 Материал.....	40
3.2 Установка «Луч».....	41
3.3 Технологические параметры спекания .....	41
3.4 Схема эксперимента .....	42
3.5 Характеристики оплавленного слоя порошка ВТ1-0.....	43
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	47
4.1 Структура работы в рамках научного исследования.....	47
4.2 Потенциальные потребители результатов исследования.....	48
4.3 Анализ конкурентных технических решений .....	49
4.4 Определение трудоемкости выполнения работ .....	52
4.5 Разработка графика проведения научного исследования .....	54
4.6 Бюджет научно-исследовательской работы (НИР).....	57
4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательскую работу	62

4.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	63
5 Социальная ответственность .....	70
5.1 Введение .....	70
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ..	71
5.3 Производственная безопасность .....	73
5.4 Анализ вредных факторов при изготовлении изделия .....	74
5.5 Анализ опасных факторов при изготовлении изделия .....	77
5.6 Экологическая безопасность .....	78
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	80
Заключение .....	83
Список публикаций студента .....	84
Список использованных источников .....	85

## Введение

Технологии аддитивного производства относятся к классу производственных процессов, основанных на построении объемного изделия по данным трехмерной цифровой модели путем послойного соединения материала. Среди широкого спектра методов производственных технологий, аддитивное производство представляет особый интерес благодаря возможности получения изделий сложных форм и структур с высокой точностью формы. Процесс аддитивного производства обладает высокой степенью автоматизации, не требующего тщательного анализа геометрии конечного изделия для определения порядка обработки функциональных поверхностей и выбора специального инструмента [1].

Существующие на сегодняшний день технологии порошкового аддитивного производства сделали возможным создание таких сложных изделий, как индивидуальные эндопротезы и биоимпланты, повторяющие сложную иерархическую костную структуру, функциональные детали узлов и тонкостенные воздухообменники, используемые в машиностроении, полые лопатки турбин авиационных двигателей и многие другие.

При формировании отдельного слоя изделия из объема металлического порошка реализуются уникальные условия соединения контактирующих частиц порошка, обеспечивающиеся спеканием порошинок. Одной из проблем получения сплошных структур является подбор технологических параметров процесса аддитивного производства, напрямую влияющих на конечные свойства изделия [2]. На сегодняшний день рекомендуемые технологические параметры поставляются производителями машин аддитивного производства вместе с сопутствующей документацией, но существует проблема выбора параметров аддитивного производства для новых и экспериментальных материалов.

Анализ литературных данных показал, что энергетические условия взаимодействия контактирующих частиц металлического порошка играют важную роль в процессе формирования отдельного слоя материала методами аддитивного производства. Источник энергии, подводя тепло непосредственно в область формирования слоя материала, инициирует оплавление частиц металлического порошка, тем самым запуская механизмы адгезии между отдельными порошинками, величина которой напрямую зависит от количества сообщенного слою порошка тепла. Таким образом можно наблюдать зависимость качества соединения порошинок в отдельном сформированном слое от физических свойств материала исходного порошка и технологических параметров процесса аддитивного плавления.

Из-за быстротечности нагрева и охлаждения очередного слоя металлического порошка в процессе формирования всего изделия, экспериментальное исследование температурных условий аддитивной наплавки вызывает затруднение. В связи с этим, для анализа условий формирования объемной структуры слоя необходимо использовать модели процесса послойного нанесения материала, расчеты согласно которым можно получить представление о влиянии технологических параметров на формирование конечного изделия.

В связи с этим, целью данной работы является изучение особенностей процесса лазерного аддитивного производства с целью определения оптимального режима изготовления металлического изделия с помощью селективного лазерного спекания.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие задачи:

- разработать физическую и математическую модели процесса формирования материала, получаемого методом лазерного оплавления;
- провести расчеты теплового вложения лазерного луча при получении аддитивного слоя с заданными характеристиками;
- проводиться экспериментальное изучение оплавленного слоя.

Объект исследования – процесс лазерного аддитивного плавления.

Предмет исследования – влияние технологических параметров процесса лазерного аддитивного плавления на скорость перемещения лазерного луча; влияние технологических параметров процесса лазерного аддитивного плавления на качество поверхности получаемого слоя.

Результаты данной работы будут полезны для нахождения оптимальных условий, позволяющих получить качественные печатанные образцы с помощью селективного лазерного спекания.

## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Технологии аддитивного производства**

Аддитивные технологии предполагают изготовление физического объекта (детали) методом послойного нанесения материала, в отличие от традиционных субтрактивных методов формирования детали, за счёт удаления материала из массива заготовки. Послойное формирование представляет собой процесс построения в среде вакуума или инертного газа с нагревом и охлаждением определенных зон материала, либо подачей уже нагретого материала непосредственно в зону построения изделия. К числу широко используемых в настоящее время аддитивных технологий относятся моделирование методом послойного наплавления (FDM), селективное лазерное спекание (SLS), электронно-лучевое плавление (EBM) [1, 3, 4, 5].

Среди основных преимуществ таких технологий выделяют возможность автоматизированного производства трехмерных изделий непосредственно из цифровой модели, что позволяет исключить такие промежуточные стадии, как изготовление оснастки и пресс-форм, отсутствие дефектов литья, и снижение трудоемкости финишной механической обработки.

Формирование изделий методом аддитивных технологий ведется двумя основными способами: послойное формирование из насыпного объема порошка (Bed Deposition) и прямое осаждение материала (Direct Deposition) [6, 7].

#### **1.1.1 Формирование изделия из насыпного объема порошка (Bed Deposition)**

При использовании данной технологии на рабочую поверхность платформы построения, как это показано на рисунке 1.1, насыпается порошковый материал, который необходимо разравнивать при помощи

специального ролика для формирования ровного слоя необходимой толщины. После выравнивания, порошок выборочно обрабатывается источником тепла (лазерный луч, электронный луч и т.д.), соединяя частицы в соответствие с контурами цифровой модели изделия [4].

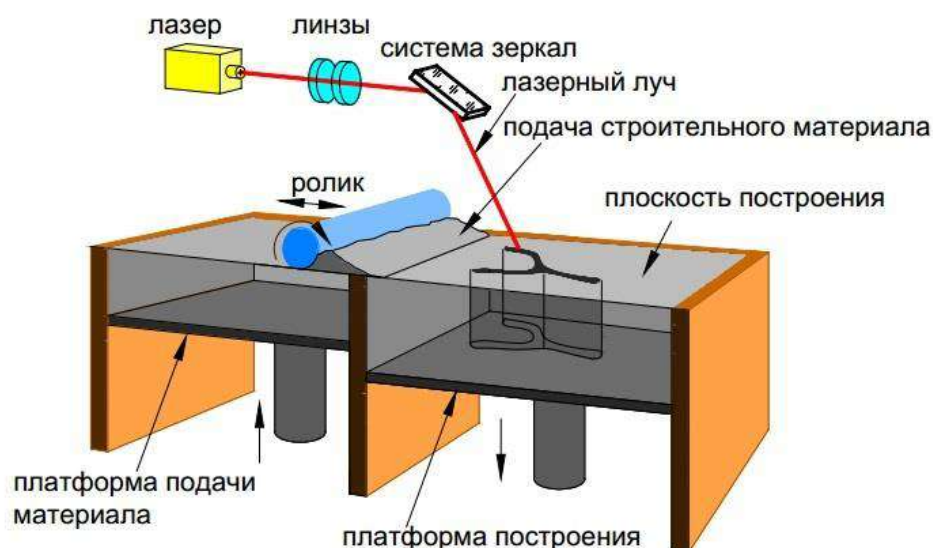


Рисунок 1.1 – Устройство машины аддитивного производства типа Bed Deposition

Даная технология предполагает наличие поверхности, на которой формируется ровный слой порошка, а затем в этом слое частицы материала выборочно объединяются путем оплавления или склеивания. Плоскость построения в процессе объединения не изменяет своего положения, при этом часть материала, не подвергающаяся воздействию теплового источника, остается нетронутой. После завершения построения платформа перемещается вертикально на величину шага построения, на ней формируется новый слой – таким образом процесс повторяется до полного построения модели [1, 2, 6].

### 1.1.2 Стереолитография (SLA)

Стереолитография (SLA или SL) представляет собой технология аддитивного производства модели, прототипов и готовых изделий из жидких фотополимерных смол. отверждение смолы происходит за счет облучения ультрафиолетовым лазером или другим сложим источником энергии.

Основой в SLA-процессе называется ультрафиолетовый лазер – лазерный луч в данном случае является не источником тепла, как во многих других аддитивных технологиях, а источник света. Принципиальное устройство машины для стереолитографии приведено на рисунке 1.2 - луч «штрихует» текущее сечение цифровой модели изделия и отверждает тонкий слой жидкого полимера в местах прохождения. Затем платформа, на которой производится построение, погружается в ванну с фотополимером на величину шага построения, новый жидкий слой наносится на затвердевший слой, и новый контур обрабатывается лазером [8].



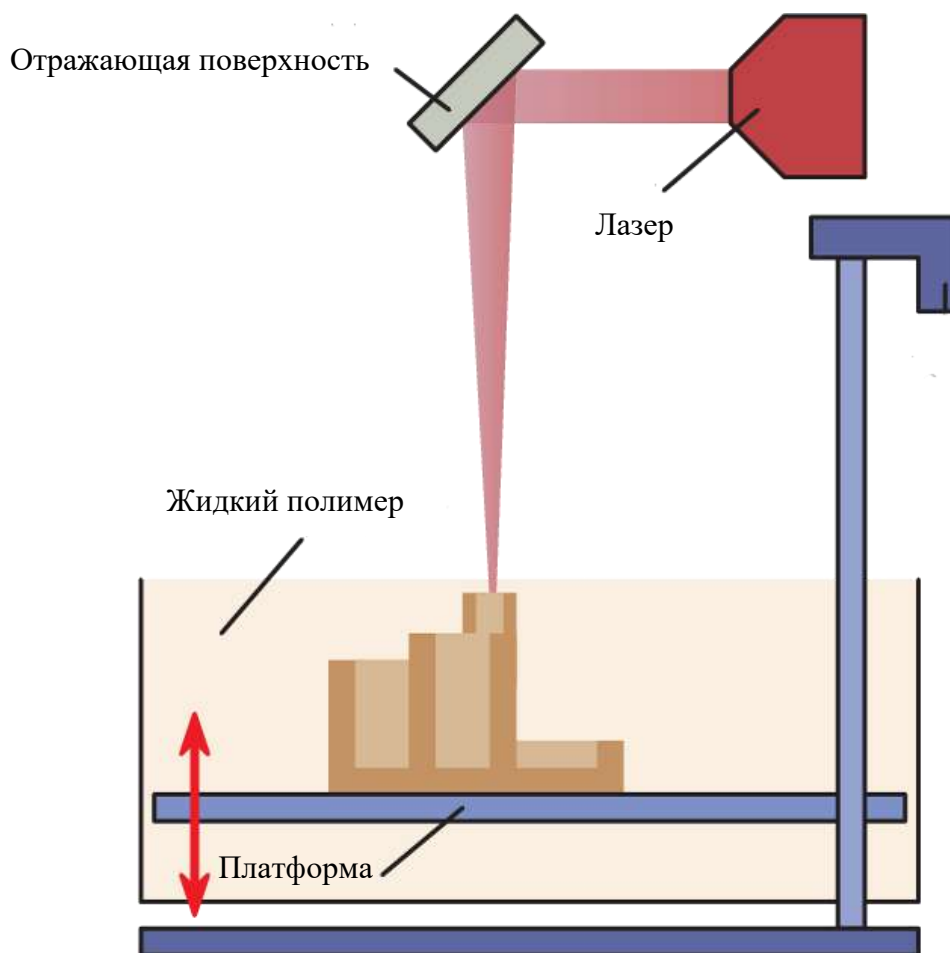


Рисунок 1.2 – Устройство машины для стереолитографии

Стереолитография широко применяется в следующих направлениях:

- выращивание литейных моделей;
- изготовление мастер-моделей (для последующего получения силиконовых форм, восковых моделей и отливок из полиуретановых смол);
- создание дизайн-моделей, макетов и функциональных прототипов;
- изготовление полноразмерных и масштабных моделей для гидродинамических, аэродинамических, прочностных и других видов исследований
- Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое, и часто модель не требует последующей обработки. При необходимости чистота поверхности может быть улучшена – отвержденный фотополимер хорошо обрабатывается и поверхность модели может быть доведена до зеркальной.

### **1.1.3 Селективное лазерное плавление (SLS)**

Машина аддитивного производства, представленная на рисунке 1 также является типичной для технологии выборочного лазерного плавления - технологии, использующей лазеры высокой мощности для создания объемных изделий за счет плавки металлических порошков.

Производственный цикл состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность – как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами, что позволяет избежать оксидации материала и делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавки производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя отражательными поверхностями с высокой скоростью отклонения.

Наиболее популярными материалами, применяемыми в данной технологии, являются порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий, золото и другие.

Также, данная технология позволяет получать изделия из керамики. Особенности аддитивного производства керамических изделий рассмотрены в разделах 1.2 и 1.3.

### **1.1.4 Прямое осаждение материала (Direct Deposition)**

В отличие от первого метода, прямое осаждение не требует формирования слоя материала на поверхности построения, материал подается в конкретное место, в которое в данный момент подводится энергия и в котором идет формирование изделия. Способ нанесения при этом зависит от материала и может производиться методами экструзии, разбрызгивания или прямым подводом энергии в место построения [1, 7].

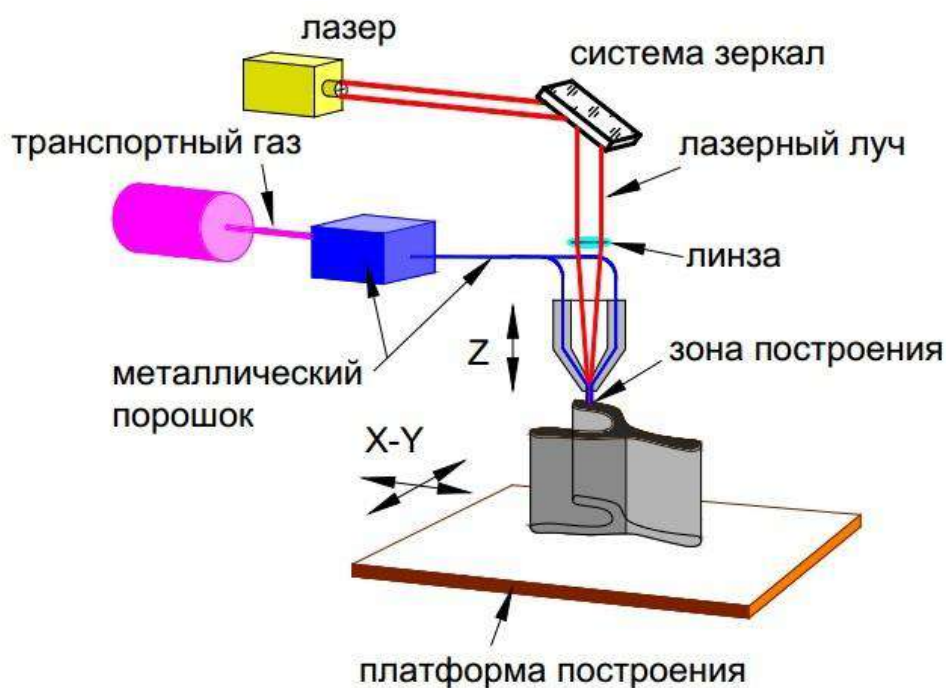


Рисунок 1.3 – Устройство машины аддитивного производства типа Direct Deposition

Платформа построения в процессе формирования изделия остается неподвижной, перемещается только головка подачи материала, движущаяся соответственно контурам цифровой модели и подающая в область построения разогретый до необходимой температуры при помощи источника тепла материал. Схематическое устройство машины для такого производства показана на рисунке 1.3.

#### 1.1.5 Моделирование методом послойного наплавления (FDM)

Моделирование методом послойного наплавления (FDM) – технология аддитивного производства, широко используемая при создании трехмерных моделей, при прототипировании и в промышленном производстве. Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков [4].

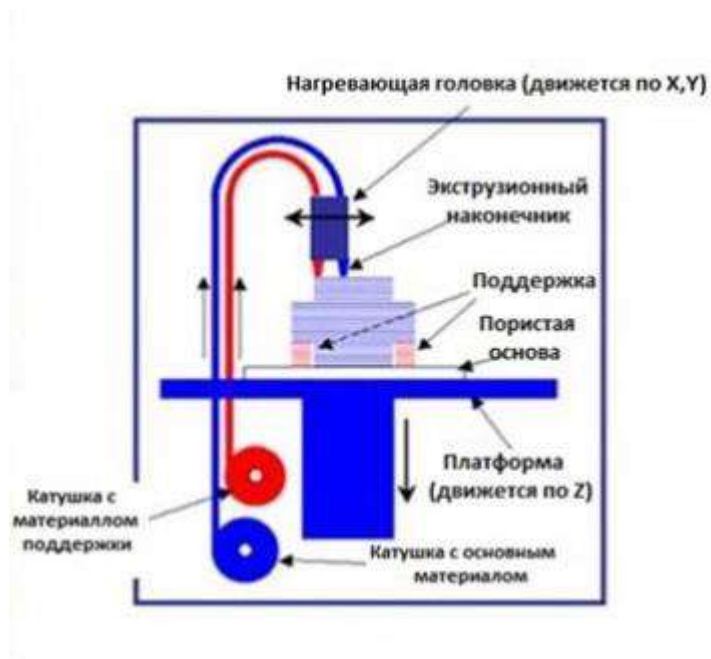


Рисунок 1.4 – Устройство машины для послойного наплавления

Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Фидсток в виде полимерной нити подводят к головке экструдера, где полимерная нить расплавляется и подается в область построения изделия, формируя объемную физическую модель в соответствии с контурами цифровой модели. Как показано на рисунке 1.4, на нагревающей головке могут располагаться сразу несколько экструзионных наконечников, подающих разные материалы. Таким образом, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати.

## 1.2 Материалы, применяемы в аддитивных технологиях

Первоначально аддитивные технологии разрабатывались с использованием в качестве исходных материалов полимеров, восков и листовых ламинатов. Впоследствии, стало возможным использование

металлов, керамики и композитов. В зависимости от выбора материала различаются технологии аддитивного производства.

### **1.2.1 Полимеры**

Как правило, аддитивное производство с использованием в качестве исходного материала полимеров заключается в направленной подаче подогретого полимера в область построения изделия при помощи перемещающейся головки экструдера.

Другой способ полимерного аддитивного производства – фотоотверждение полимера. Для отверждения может использоваться гамма-излучение, рентгеновский луч, электронный луч, ультрафиолетовое излучение, и, в некоторых случаях, видимое излучение. В коммерческом оборудовании используется только ультрафиолетовое и видимое излучение [5, 10].

Термопластичные материалы, обычно формуемые литьем, имеют линейную или разветвленную молекулярную структуру, что позволяет им расплавляться и затвердевать повторно. Фотополимеры используемые в аддитивных технологиях имеют сетчатую структуру и, как следствие, не плавятся и проявляют намного меньшую степень ползучести и релаксации напряжения [8].

### **1.2.2 Керамики**

В последнее время широкое промышленное использование в аддитивном производстве приобрели керамические материалы, что обуславливается высокой точностью формы конечных изделий, получаемых такими способами поскольку механическая постобработка керамики весьма долгим и затратным процессом.

Аддитивное производство с прямым нанесением мелкодисперсных керамических суспензий через инжекционное сопло с успехом применяется в исследовательских лабораториях и в производстве для изготовления

покрытий и миниатюрных изделий сложной формы. В промышленности аддитивное производство также применяется для изготовления песчаных форм для литья.

В качестве кераметических материалов для аддитивного производства часто применяются диоксид циркония, оксид титана, титанат бария.

Таким образом можно отметить, что разнообразие технологий аддитивного производства на сегодняшний день позволяет изготавливать изделия из различных материалов с необходимыми механическими свойствами. Для получения сплошной структуры изделия из выбранного материала важен правильный подбор аддитивной технологии и технологических параметров процесса формирования изделия [12, 13].

### **1.2.3 Металлы**

Металлы в качестве исходного материала для аддитивного производства как правило используются в виде порошка. Под порошками понимают сыпучие материалы с характерным размером частиц до 1,0 мм. Порошки классифицируют по размерам частиц (по условному диаметру  $d$ ) [11].

В настоящее время не существует общих требований к металлпорошковым композициям, применяемым в аддитивных технологиях. В различных машинах используются порошки различного фракционного состава. Общим требованием к таким порошкам является сферическая форма порошинок, что обеспечивает более компактную усадку и приближение насыпной плотности порошка к плотности металла, из которого состоит этот порошок, а также обеспечивает «текучесть» порошка в системах подачи порошка с минимальным сопротивлением.

Наибольшее распространение в аддитивном производстве на сегодняшний день находят нижеследующие металлы:

- Алюминий

- Кобальт
- Медь
- Инконель
- Никель
- Драгоценные металлы (золото, серебро, платина)
- Нержавеющая сталь
- Тантал
- Титан
- Инструментальная сталь
- Вольфрам.

### **Аддитивное производство с титаном**

Титан является одним из наиболее популярных материалов для 3d печати в производстве, особенно в аэрокосмических и медицинских приложениях. Он объединяет легкость алюминия с прочностью стали, и он не токсичен. Однако этим преимуществам противостоит относительно высокая стоимость титана. Поэтому снижение отходов делает АП привлекательным вариантом для получения титановых деталей.

Порошковый титан легко воспламеняется и взрывается при контакте с водой, при температурах, превышающий 700 °C. По этой причине 3d печать с титановым порошком выполняется в вакуумных или в аргоновых камерах. Также можно выполнять 3d печать, используя плавку титановой проволоки электронным лучом (EBM) [5], что устраняет риски взрывной реакции.

Наибольшее распространение в аддитивном производстве на сегодняшний день находят сплавы титана, стальные сплавы и сплавы системы Co-Cr-Mo, применяемые в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая , судостроение, приборостроение [9, 10].

### 1.3 Особенности формирования соединения на границе раздела слоев

Одной из особенностей аддитивных технологий является возможность получения изделий, состоящих из двух и более компонентов, представляющих различные по своей природе материалы. В таких изделиях возможны следующие варианты сочетания компонентов:

- сочетание двух и более различных металлов (Fe – Al) [14];
- сочетание керамики и металла (Y-стабилизированный Zr и хромистая сталь) [12];
- композиты на основе полимеров (термопластик и углеродное волокно) [19].

Важной характеристикой таких структур является адгезия на границе раздела слоев из различных материалов. Механизм формирования адгезионных связей может рассматриваться с нескольких позиций, в зависимости от состава и соотношения компонентов и параметров процесса изготовления изделия:

- физический контакт и последующая химическая реакция [14];
- диффузионное растворение компонентов друг в друге [15];
- топокхимические реакции на поверхности контакта двух материалов [16];
- взаимодействие на электронном уровне [17].

Как правило, на первом, обязательном, этапе образования адгезионного соединения устанавливается контакт поверхностей, на следующем этапе возникает межфазное взаимодействие, которое может иметь различную природу. Адгезионные связи на этом этапе формируются по четырем основным механизмам, представленным на рисунке 1.7 [18]:

- механический – соединение двух контактирующих поверхностей за счет сил взаимного сцепления;
- диффузионный – взаимное проникновение молекул и атомов через границу фаз;



- электронный – возникновение двойного электрического слоя на межфазной границе;
- адсорбционный – соединение под действием межмолекулярных сил.

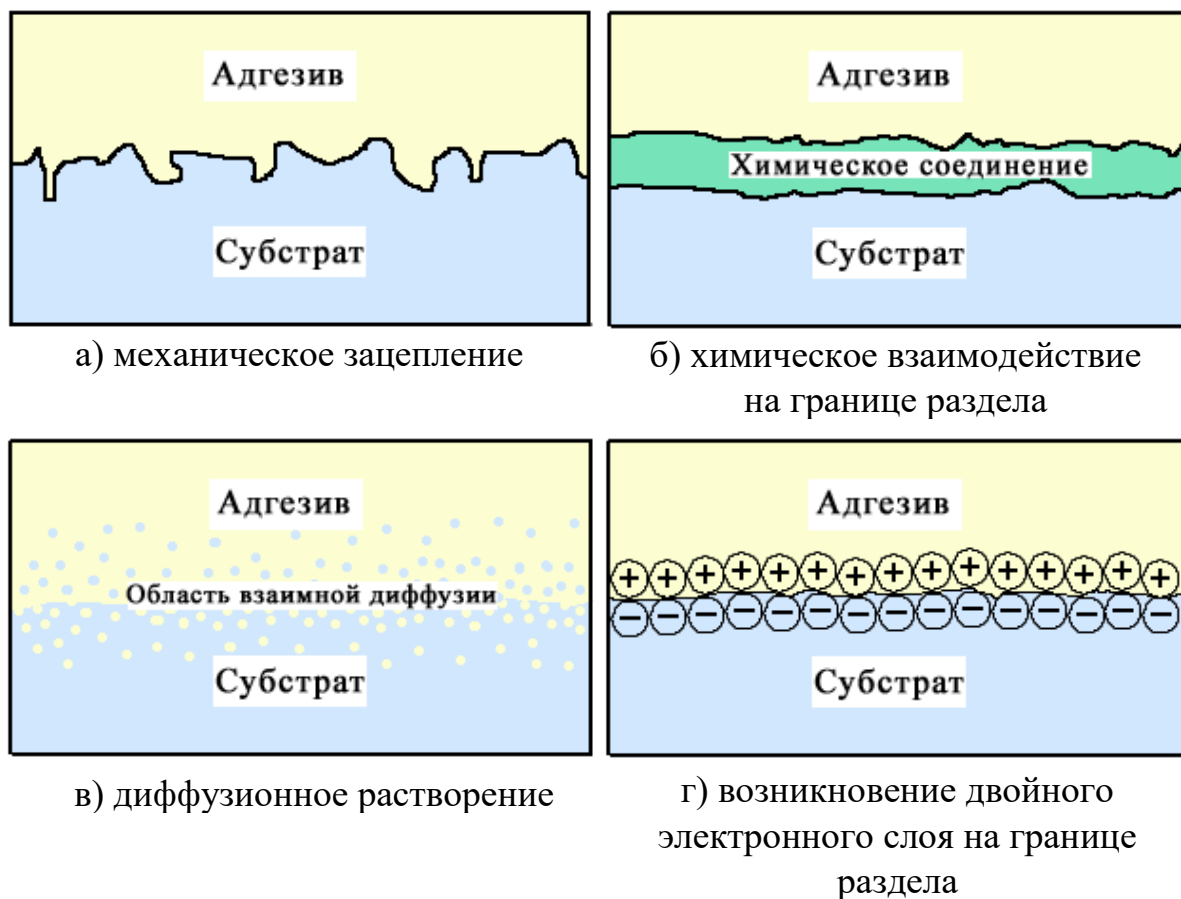


Рисунок 1.5 – Механизмы адгезионного соединения

В общем случае все эти механизмы могут работать одновременно и механизм адгезии является смешанным. Однако, в отдельных условиях один из механизмов может преобладать. Так, например, для металлов чаще основную роль играют диффузионный и электронный механизмы, для керамик – механический (при прессовании), диффузионный (при спекании). В результате соединения металла с керамикой возможно сочетание механического и адсорбционного механизмов.

## 1.4 Достоинства и недостатки технологий аддитивного производства

В настоящее время скорость и стоимость внедрения в производство технологии напрямую зависит от эффективности работы каждой технологической цепочки на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в полную величину.

Актуальной является задача сведения комплекса типовых процессов в единый технологический процесс, позволяющий в сжатые сроки изготовить прототипы изделий с любой степенью сложности и точности внутренней и внешней поверхности без предварительных затрат на подготовку оснастки. Не менее важным является умение изготавливать единичные копии моделей сложной формы в таких сферах человеческой деятельности, как протезирование и реставрационные работы.

В основе своей процессы аддитивного производства состоят из следующих шагов: подготовка геометрического образа трехмерного объекта, формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта, послойное наложение этих сечений в процессе синтеза и комбинирование слоев из конкретного материала. Кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами:

- отпадает необходимость в топологическом проектировании и распознавании по элементам, поскольку планирование процессов, в ходе которого используется эта информация, не требуется;
- не требуется определять геометрию пустого пространства, поскольку материал добавляется, а не снимается;
- не нужно определять несколько наборов оборудования;
- нет необходимости в зажимах и креплениях;
- не нужно проектировать и изготавливать формы и штампы.

В то же время, существует ряд проблем аддитивного производства:

- толщина слоя, равная 0,1 мм является причиной четко выраженной текстуры на поверхности изделия, устранить которую можно только финишной обработкой. Уменьшение толщины слоя приводит к удорожанию установки и уменьшению скорости производства;

- размеры изделий ограничены размером рабочей камеры установки;

- ограниченность спектра используемых материалов для отдельной аддитивной технологии;

- ухудшенные прочностные характеристики изделий;

- низкая скорость производства;

- высокая стоимость производства.

Таким образом, в современных конкурентных рыночных условиях, развитие аддитивного производства должно быть направлено в сторону уменьшения стоимости и повышения скорости технологий прототипирования [19].

## **2 Объект и методы исследования**

### **2.1 Моделирование процесса формирования отдельного слоя материала методом лазерной аддитивной технологии**

Объектом моделирования являлся процесс лазерного аддитивного плавления металлического порошка. Модель отражает физические процессы, протекающие в результате теплового воздействия лазерного луча на поверхность насыпного слоя металлического порошка

#### **2.1.1 Материалы**

Аддитивные технологии с применением лазерной обработки позволяют использовать широкий набор металлических порошков в качестве исходных материалов. Для проведения расчетов в рамках математической модели необходимо знать физические свойства используемого материала и учитывать их влияние на технологические параметры процесса аддитивного плавления.

В качестве материалов для модели были выбраны следующие металлы:

- титан;
- медь;
- никель.

Необходимые параметры для расчетов физические характеристики данных металлов приведены в таблице 1. (Температура плавления  $T_{пл}$ , плотность  $\rho$ , теплоёмкость  $c$ , скрытая теплота  $L$ ).

Таблица 2.1 – Физические характеристики материалов

Материал	$T_{пл}, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/кг*К}$	$L, \text{Дж/кг}$
Титан	1944	4260	854,1	322916
Медь	1353	8030	500	205000
Никель	1728	8100	625	301694

## 2.2 Условия получения спеченного слоя

Для обеспечения качества спеченного поверхностного слоя из порошковых материалов, имеющих разный диапазон температуры плавления, изучалось изменение уровня деформаций и толщины спекания в зависимости от режимов спекания [20].

### 2.2.1 Физическая модель

Представленная модель является упрощенной и не учитывает ряд тепловых потерь в процессе плавления, в том числе рассеивание тепла в атмосферу рабочей камеры, перераспределение тепла в объеме металлического порошка и отвод тепла в область нижних, уже сформированных слоев, причиной чему является разность температур между обрабатываемым лазером слоем порошка и уже сформированными нижними слоями изделия, показанный на рисунке 2.1.

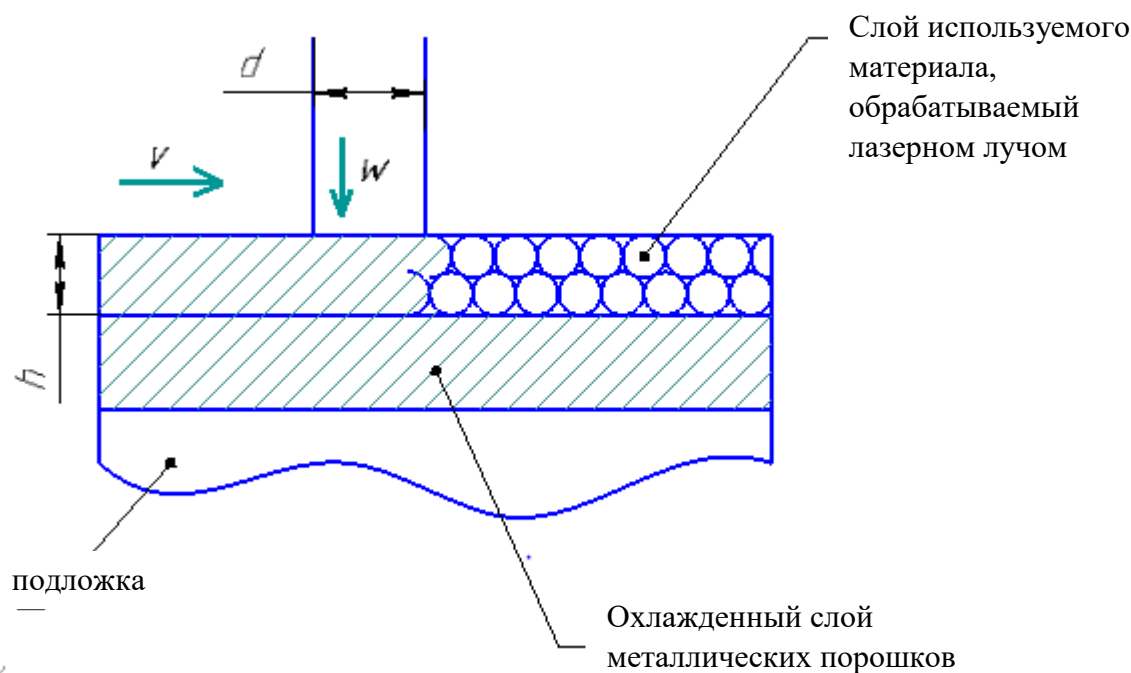


Рисунок 2.1 – Физическая модель процесса лазерного аддитивного плавления.

Пусть пятно лазерного луча диаметром  $d$  движется по поверхности насыпного слоя металлического порошка толщиной  $h$  со скоростью  $v$ , как это показано на рисунке 1, при этом сообщая объему порошка мощность  $W$ . В целях упрощения расчетов энергетических условий формирования слоя материала примем формой пятна лазерного луча – квадрат со стороной равной  $a$ , изображенный на рисунке 2.

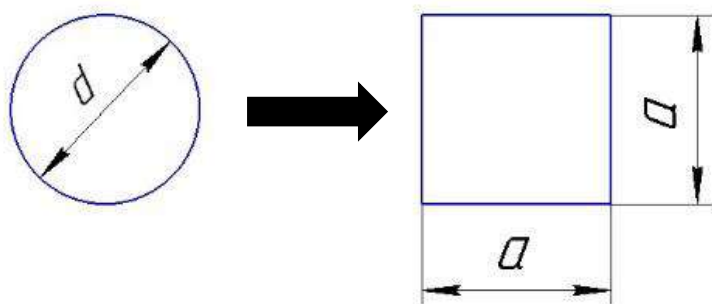


Рисунок 2.2 – Форма пятна лазерного луча

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4Б51	Юань Сюдун

<b>Институт</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ОМ</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	«Материаловедение и технологии материалов»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Материально-технические ресурсы: компьютер (30000р); энергетические ресурсы: электрическая энергия (567р); информационные ресурсы: научные журналы, монографии, учебники и статьи по теме исследований, (2000р); человеческие ресурсы: студент (инженер-дипломник), научный руководитель (2 человека).</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Данная НИР проводится впервые, поэтому нормы и нормативы расходования ресурсов отсутствуют.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению. На основании п. 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 27,1% от фонда оплаты труда.</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Данная научно-исследовательская работа финансируется за счет средств государственного бюджета и по характеру получаемых результатов относится к поисковым работам. Результаты данных работ, как правило, не заканчиваются созданием и промышленным внедрением новых видов материалов и средств изготовления продукции. Они лишь выясняют технические, организационные и экономические возможности их получения. При положительных результатах выводы поисковых работ могут быть использованы в научно-исследовательских работах прикладного характера. По поисковым НИР, которые не заканчиваются достижением положительных результатов, определяется</i>
---	--

	<i>лишь сумма производственных затрат и капитальных вложений на их выполнение.</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Согласно расчетам, бюджет затрат на проведение НИР составляет 108106,3р., включая затраты на заработную плату (79809,16р.), страховые отчисления (21628,4р.), электроэнергию (567р.), и прочие накладные расходы (500 р.).</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>По результатам НИР были выполнены поставленные задачи. Однако, поскольку данная НИР относится к поисковым работам, то оценивать её эффективность преждевременно. Эффективность может быть определена только после проведения прикладных исследований, результатом которых будет получение конечного продукта.</i>

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	03.04.2019
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И. В.	к.э.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б51	Юань Сюдун		



## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Структура работы в рамках научного исследования**

Для правильного планирования, а также определения трудоемкости выполнения НИР необходимо разбить ее на этапы. Под этапом понимается крупная часть работы, которая имеет самостоятельное значение и является объемом планирования и финансирования. Структура данной НИР:

1. Подготовительный этап. Выбор темы; изучение, анализ информации по выбранной теме. Техничко-экономическое обоснование целесообразности проведения исследований по теме. Определение рабочей группы, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты.

2. Формирование теоретической части. Выявление возможных направлений исследования.

3. Проведение экспериментальных работ по теоретическим разделам.

4. Количественная оценка экспериментального исследования, выбор параметров, проведение численного моделирования.

5. Корректировка разработанных параметров после получения результатов эксперимента.

6. Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки. Составление технологического отчета.

7. Завершающий этап. Проведение анализа результатов исследования всей рабочей группы. Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации.

Данную НИР можно разделить на следующие этапы (Таблица 4.1):

- выдача задания
- выбор направления исследований
- теоретические и экспериментальные исследования
- обсуждение результатов

- составление отчета

- защита отчета

Работу выполняли 2 человека: научный руководитель (науч.рук.), инженер-дипломник (инж.).

Таблица 4.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выдача задания	1	Составление и утверждение технического задания	науч. рук
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	науч. рук., инж.
	3	Выбор направления исследований	науч. рук.
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Исследование процессов аддитивного производства, условий формирования наплавленного слоя	инж.
	5	Выбор методики исследования	науч.рук.
	6	Проведение численного моделирования процесса формирования наплавленного слоя	инж
	7	Написание программного обеспечения для проведения расчетов параметров наплавки	инж
Обсуждение результатов	8	Обработка полученных результатов после проведения численного моделирования	инж
	9	Научное обоснование результатов и выводы	науч. рук, инж
Составление отчета	10	Разработка плана по оформлению НИР	науч. рук, инж
	11	Оформление отчета НИР	инж
Защита отчета	12	Защита выпускной квалификационной работы	инж




## 4.2 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование [26]. Для рассмотрения потенциального потребителя сегментацию потребителей

товаров производственно-технического назначения, представленную в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Карта сегментирования рынка производственно-технического назначения

		Машиностроение	Самолетостроение	Автомобилестроение	Медицина
Размер предприятия	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

 Предприятие А     Предприятие Б     Предприятие В

### 4.3 Анализ конкурентных технических решений

Для анализа конкурентных технических решений, следует выбрать несколько разработок похожих на исследуемую и провести детальное сравнение. Для упрощения сравнения используем таблицу 4.3, где  $B_{\phi}$  – технология, разработанная в результате выполнения научно-исследовательской работы,  $B_{kl}$  – конкурентная технология отработки технологии аддитивного производства методом подбора технологических параметров [26].

Таблица 4.3 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		$B_{\phi}$	$B_{kl}$	$K_{\phi}$	$K_{kl}$
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					

1. Расширение линейки продуктов, выпускаемых предприятием	0,4	5	2	2	0,8
2. Сокращение времени на разработку технологического процесса	0,2	4	2	0,8	0,4
3. Энергоэкономичность	0,3	5	2	1,5	0,6
4. Надежность технологии	0,06	4	4	0,24	0,24
5. Сокращение накладных расходов	0,02	3	1	0,06	0,02
6. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,02	5	5	0,1	0,1
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>26</b>	<b>16</b>	<b>4,7</b>	<b>2,38</b>
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
1. Конкурентоспособность	0,4	5	3	2	1,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,2	3	5	0,6	1
3. Цена	0,2	5	2	1	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации технологии	0,1	5	2	0,5	0,2
5. Финансирование научной разработки	0,1	2	2	0,2	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>14</b>	<b>4,3</b>	<b>3</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i B_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл i-го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует объяснить:

- чем обусловлена уязвимость позиции конкурентов и возможно занять свою нишу и увеличить определенную долю рынка;
- в чем конкурентное преимущество разработки.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие

покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

Таблица 4.4 – Матрица SWOT

<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Экономичность и энергоэффективность С2. Наличие бюджетного финансирования С3. Значительное сокращение расходов на отработку технологии С4. Сокращение времени на разработку технологического процесса	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Несовершенство математической модели Сл2. Узкий функционал программного обеспечения, выполняющего расчеты согласно математической модели Сл3. Отсутствие квалифицированного персонала
<b>Возможности:</b> В1. Возможность использования в разных отраслях В2. Развитие аддитивного производства В3. Необходимость снижения расходов на отработку технологии при мелкосерийном производстве	<b>Угрозы:</b> У1. Разработка и внедрение конкурентных способов отработки технологии в аддитивном производстве У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз основывается на результатах анализа, проведенного в предыдущих разделах бакалаврской работы.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 4.5 - Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта		C1	C2	C3
	B1	+	0	+
	B2	+	+	+
	B3	+	0	+

Третий этап – составление итоговой матрицы SWOT исходя из данных таблиц 4.4 и 4.5.

Таблица 4.6 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Экономичность и энергоэффективность	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
--	--	--

	<p>С2. Наличие бюджетного финансирования</p> <p>С3. Значительное сокращение расходов на отработку технологии</p> <p>С4. Сокращение времени на разработку технологического процесса</p>	<p>Сл1. Несовершенство математической модели</p> <p>Сл2. Узкий функционал программного обеспечения, выполняющего расчеты согласно математической модели</p> <p>Сл3. Отсутствие квалифицированного персонала</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Возможность использования в разных отраслях</p> <p>В2. Развитие аддитивного производства</p> <p>В3. Необходимость снижения расходов на отработку технологии при мелкосерийном производстве</p>	<p>1. Возможность внедрять технологию за счёт экономичности в разные отрасли промышленности</p> <p>2. Энергоэффективность является основным фактором использования технологии в разных отраслях</p> <p>3. Низкая стоимость производства позволяет конкурировать с другими видами отработки технологии</p> <p>4. Снижение стоимости отработки технологии производства способствует развитию аддитивных технологий</p>	<p>1. Внедрение технологии в производство</p> <p>2. Использование в разных отраслях способствует расширению базы данных и функционала программного обеспечения</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Разработка и внедрение конкурентных способов отработки технологии в аддитивном производстве</p> <p>У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>	<p>1. Высокая энергоэффективность производства может решить проблему с конкуренцией</p> <p>2. Наличие своевременного бюджетного финансирования позволит сохранять высокую конкурентоспособность разработки</p>	<p>1. Использование в разных отраслях способствует расширению базы данных и функционала программного обеспечения</p> <p>2. Возможность выхода на внешний рынок</p>

#### 4.4 Определение трудоемкости выполнения работ

Оценка трудоемкости выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ сопряжена не только с отсутствием утвержденных нормативов, но и существенными трудностями в разработке концептуальных подходов к их обоснованию [27].

Если НИР проводится впервые и вследствие этого отсутствуют нормативы, то трудоемкость отдельных этапов может быть рассчитана опытно-статистическим методом. Указанный метод может быть реализован двумя способами:

1. Путем анализа, когда необходимые трудовые запасы определяются по работам, проведенным данным коллективом ранее.
2. Вероятным методом.

При первом способе опытно-статистического метода используют отчетные данные фактической трудоемкости работ, осуществляемых ранее. В отсутствии аналогичных работ определяют вероятным методом непосредственно их продолжительность на основе системы оценок.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$ , используется следующая формула [28]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{max i}}{5}$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

## 4.5 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,2$$

Временные показатели проведения данного научного исследования представлены в таблице 4.6.

Условные обозначения: научный руководитель (р), инженер-дипломник (и).

Таблица 4.7 - Временные показатели проведения научного исследования



Название работы	Трудоёмкость работ						Испол нител и		$T_{pi}$ , дни		$T_{ki}$ , дни	
	$t_{min i}$ , чел-дни		$t_{max i}$ , чел- дни		$t_{ож i}$ , чел-дни		р	и	р	и	р	и
	р	и	р	и	р	и						
1. Составление и утверждение технического задания	7	-	15	-	10	-	+	-	1	-	1, 2	-
2. Подбор и изучение материалов по теме	20	20	40	40	28	28	+	+	3	1 4	3, 6	17
3. Выбор направления исследований	6	-	15	-	10	-	+	-	2	-	2, 4	
4. Исследования процессов аддитивного производства, условий формирования наплавленного слоя	-	7	-	15	-	10	-	+	-	1 0		12
5. Выбор материал и методики для исследования	7	-	14	-	10	-	+	-	5	-	6	
6. Проведение численного моделирования процесса формирования наплавленного слоя	-	25	-	35	-	29	-	+	-	2 9		36
7. Написание программного обеспечения для проведения расчетов параметров	-	6	-	10	-	8	-	+	-	8		10

наплавки												
8. Обработка полученных результатов после проведения численного моделирования	-	11	-	23	-	16	-	+	-	1 6		20
9. Научное обоснование результатов и выводы	7	7	14	14	10	10	+	+	5	5	6	6
10. Разработка плана по оформлению НИР	2	2	5	5	3	3	+	+	4	1, 5	4, 8	2
11. Оформление отчета НИР	-	20	-	30	-	24	-	+	-	2 4		30
12. Защита выпускной квалификационной работы								+	-	1		1

На основе таблицы 4.6 строится календарный план-график (таблица 4.8).

Таблица 4.8 - Календарный план-график проведения НИР по теме

№ работ	Исполнители	$T_{ki}$ кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																	
			дек.		январ.		февр.			март			апрель			май			июнь	
			2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	р	12																		
2	р, и	17																		
3	р	12																		
4	и	12																		
5	р	12																		
6	и	36																		
7	и	10																		
8	и	20																		
9	р, и	6																		
10	р, и	2																		

11	и	30																	
12	и	1																	I

☐ - научный руководитель

☒ - инженер – дипломник

#### 4.6 Бюджет научно-исследовательской работы (НИР)

При планировании бюджета НИР должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НИР используется следующая группировка затрат по статьям [29]:

1. материальные затраты НИР;
2. затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
3. основная заработная плата исполнителей темы;
4. дополнительная заработная плата исполнителей темы;
5. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
6. затраты научные и производственные командировки;
7. контрагентные расходы;
8. накладные расходы.

Так как данная НИР проводилась без специального оборудования и использования конкретных материалов, а выполнялась по средствам интеллектуальной собственности, то при расчете бюджета НИР будет использоваться следующая группировка затрат по статьям:

1. основная заработная плата исполнителей темы;
2. дополнительная заработная плата исполнителей темы;
3. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
4. накладные расходы.

Т.е. не учитываются статьи на материальные затраты, затраты на специальное оборудование, затраты научные и производственные командировки, контрагентные расходы.

#### Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

НИР проводили 2 человека: доцент кафедры материаловедения в машиностроении ТПУ - научный руководитель работы (науч. рук.) и инженер лаборатории (инж.). Так как в качестве инженера лаборатории выступал инженер-дипломник, то расчет статьи по основной заработной плате будет учтен только для научного руководителя. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $З_{осн}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 8);

$З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_м \cdot М}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,4}{251} = 2125 \text{ руб.},$$

$$З_{дн} = \frac{З_м \cdot М}{F_d} = \frac{19291 \cdot 10,4}{279} = 719 \text{ руб.},$$

где  $З_м$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$М$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня  $М = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней  $М = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{tc}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.9 – Показатели рабочего времени научно-технического персонала

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	66	66
Потери рабочего времени	48	20
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	279

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад  $Z_b$  определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Таблица 4.10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнитель	Оклад, руб	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$З_{м},$ руб.	$З_{дн},$ руб.	$T_{р},$ раб. дн.	$З_{осн},$ раб. дн.
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2125	20	42500
Инженер	9893	0.3	0.2	1.3	19291	719	134	96346
Итого $З_{осн}$								138846

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций. Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = k_{доп} * З_{осн} = 0,13 * 42500 = 5525 \text{ руб.},$$

$$З_{доп} = k_{доп} * З_{осн} = 0,13 * 96346 = 12525 \text{ руб.},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

#### **Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп})$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 28% от фонда оплаты труда [28].

Таблица 4.11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	42500	5525
Инженер	96346	12525
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	28	
Отчисления во внебюджетные фонды	13447	30484
Итого	43931 руб.	

## Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Рассчитаем каждую статью накладных расходов:

1. Расходы на печать и ксерокопирование материалов исследования рассчитываются по следующей формуле:

$$П = C_{\text{стр}} * K_{\text{стр}},$$

где  $C_{\text{стр}}$  - стоимость печати / ксерокопирования одной страницы;  $K_{\text{стр}}$  - количество распечатанных страниц.

Стоимость одной печатной страницы установилась на уровне 2 рублей, всего сделано 200 страниц печати и 50 страниц ксерокопии. Тогда расходы на печать и ксерокопирование составят:

$$П = 2 * (200 + 50) = 500 \text{ рублей}$$

2. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$Э = Ц * N * n * t_{\text{зан.ч}},$$

где  $Ц$  — стоимость 1 кВт/ ч электроэнергии, р.;

$N$  — мощность оборудования, кВт;

$n$  — количество единиц оборудования одного вида, ед.;

$t_{\text{зан.ч}}$  — время занятости оборудования, ч.

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Ц, р.	N, Вт	n	t <sub>зан.ч.</sub> , ч.	Затраты, руб.
Компьютер (ПК)	5,8	0,4	1	804	1865

Величина накладных расходов составит:

$$З_{\text{накл.}} = 500 + 1865 = 2365 \text{ руб.}$$

Таблица 4.13 - Затраты на оборудование

Материалы и оборудование	Ед. изм.	Кол-во материала, ед.	Цена за ед., руб.	Затраты, руб. амортизация
Компьютер	Шт	1	40000	3333
Итого				40000

Амортизация рассчитывается на 3 лет, с учетом проведения работ исследование в течение трех месяцев (1/4 года):

$$\frac{40000}{3} = 13333 \text{ руб.}; \frac{13333}{4} = 3333 \text{ руб.}$$

#### 4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательскую работу

Определение бюджета затрат на научно-исследовательскую работу по каждому варианту исполнения приведено в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Статья	Научный руководитель	Инженер
1. Затраты по основной заработной	42500 рублей	96346 рублей



плате исполнителей темы		
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5525 рублей	12525 рублей
3. Отчисления во внебюджетные фонды	13447 рублей	30484 рублей
4. Накладные расходы	2365 рублей	
5. Амортизация	3333 рублей	
6. Бюджет затрат НИР	206525 рублей	

Таким образом, в данном разделе работы проведено экономическое обоснование проведенных исследований:

- составлена структура работы и на ее основе проведены расчеты трудоемкости НИР и ее бюджет;
- рассчитан бюджет затрат НИР, который составил 206525 рублей;
- рассчитано время проведения НИР – 118 дней или примерно 17 недель.

#### **4.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения [26].

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{\text{pi}}$  – технология, разработанная в результате выполнения научно-исследовательской работы;

$\Phi_{\text{max}}$  – конкурентная разработка отработки технологии аддитивного производства методом подбора технологических параметров. Стоимость разработки такой технологии повышается из-за необходимости проведения экспериментальных исследований, включающих отработку технологических параметров на промышленном оборудовании аддитивного производства.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{199636,4}{307133} = 0,65$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{307133}{307133} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 4.15).

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	5	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	3	3
3. Помехоустойчивость	0,05	4	3
4. Энергосбережение	0,4	4	1
5. Надежность	0,1	4	4
6. Материалоемкость	0,05	5	3
ИТОГО	1	4,05	2,3

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{исп.}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}} \qquad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}}$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,05}{0,65} = 6,2$$

$$I_{исп.2} = \frac{2,3}{1} = 2,3$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{6,2}{2,3} = 2,7$$

Таблица 4.16 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0.65	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,05	2,3
3	Интегральный показатель эффективности	6,2	2,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	2,7	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## **Список публикаций студента**

1. Юань С., Рагулина М. П., Зенин Б. С. Температурные условия создания изделий методом аддитивных технологий на примере металлических и полиметаллических порошков // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, г. Томск, 26 - 30 Ноября 2018. - Томск: ТПУ, 2018 - С. 318-319.